

## Синтез управлений взаимодействием производственных и энергетических предприятий по критерию минимизации выбросов

Р. И. Сольницев, Лэй Ван✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ 18361206765@163.com

**Аннотация.** Рассматривается замкнутая система управления «Природа–Техногеника» (ЗСУПТ) в виде предприятий источников энергии (ПИЭ) и промышленных предприятий (ПП). Реализация такой ЗСУПТ направлена на решение общей задачи минимизации выбросов загрязняющих веществ ПИЭ и ПП. К основным компонентам этой системы относятся: объект управления, преобразователи, измерительные устройства, устройства управления, законы управления, исполнительные устройства. Используются результаты ранее выполненных авторами исследований ПИЭ и ПП на метауровне и предложены математические модели на макроуровне, которые служат для синтеза системы управления ПИЭ и ПП. Критерием синтеза управлений служит минимизация ошибки регулирования выбросов, обычно встречающихся в промышленном производстве. Математические модели ПИЭ и ПП на макроуровне представляются в виде многомерной САУ. Синтез управлений сводится к параметрическому синтезу ПИД-регуляторов. Построение ЗСУПТ из ПИЭ и ПП зависит от типа загрязнителя и помимо обычных звеньев САУ включает абсорберы, катализаторы, химические адсорберы, фильтры и другие звенья исполнительных устройств.

**Ключевые слова:** вектор, матрица, система управления «Природа–Техногеника», ПИД-регулятор, макромоделли, параметрический синтез

**Для цитирования:** Сольницев Р. И., Ван Лэй. Синтез управлений взаимодействием производственных и энергетических предприятий по критерию минимизации выбросов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 9. С. 22–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-22-34.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Control Synthesis of Interactions between Production and Power Enterprises According to the Criterion of Emission Minimization

R. I. Solnitsev, Lei Wang✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ 18361206765@163.com

**Abstract.** The «Nature–Technology» closed-loop control system in the form of production and power enterprises is considered. The implementation of such a closed-loop control system is aimed at solving the general problem of minimizing pollutant emissions of production and power enterprises. This system is composed of the following main components: control object, converters, measuring devices, control devices, control laws, and actuators. This paper relies on the authors' previous research into the interaction between production and power enterprises at a meta level. In this study, the authors propose macro-level mathematical models with the purpose of synthesizing the control system of production and power enterprises. The criterion for control synthesis is to minimize the control error of emissions commonly encountered in industrial production. The macro-level mathematical models are represented as a multidimensional control system. Control synthesis is reduced to a parametric synthesis of PID-

controllers. Construction of the «Nature–Technology» closed-loop control system of production and power enterprises depends on the pollutant type and, along with the conventional links of a control system, includes absorbers, catalysts, chemical adsorbers, filters, and other actuator links.

**Keywords:** vector, matrix, «Nature–Technology» control system, PID-controllers, macro-models, parametric synthesis

**For citation:** Solnitsev R. I., Wang Lei. Control Synthesis of Interactions between Production and Power Enterprises According to the Criterion of Emission Minimization // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 9. P. 22–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-22-34.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Согласно последнему докладу Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization, WMO) о состоянии атмосферы, выбросы в результате промышленного производства продолжают расти, поэтому эффективное их сокращение имеет большое практическое значение. В [1] рассматриваются общие и конкретные меры по эксплуатации предприятий-источников энергии (ПИЭ) и промышленных предприятий (ПП), которые направлены на повышение корпоративной ответственности и участие в деятельности по сокращению выбросов. В [2] изучается влияние энергопотребления на загрязнение воздуха на примере промышленной структуры г. Шанхай, Китай. В данной статье на основе предыдущих публикаций этой тематики [3] предложен подход к синтезу управления взаимодействующими ПИЭ и ПП для снижения выбросов на основе концепции замкнутой системы управления «Природа–Техногеника» (ЗСУПТ ПИЭ и ПП). Решается задача параметрического синтеза управлений по минимизации выбросов по инте-

гральному критерию для многомерной «ЗСУПТ ПИЭ и ПП». Наряду с известными подходами по минимизации выбросов разработанная система «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» может быть применена в повседневной производственной деятельности.

**Математические модели замкнутых систем управления предприятиями-источниками энергии и промышленными предприятиями на макроуровне.** В предыдущих публикациях проведены анализ и моделирование «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» по математическим моделям на метауровне [4]. В данной статье приводятся модели «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» на макроуровне как многомерные системы управления, предназначенные для решения задач синтеза регуляторов. На рис. 1 представлена структурная схема взаимодействия ПИЭ и ПП в ЗСУПТ.

На рисунке обозначены: ИзУ<sub>1</sub> – измерительные устройства ПИЭ; ОУ<sub>1</sub> – объект управления в ПИЭ; ИУ<sub>1</sub> – исполнительные устройства ПИЭ; Упр<sub>1</sub> – закон управления по выбросам ПИЭ; УпУ<sub>1</sub> – устройства управления из ПИЭ; Пр – пре-

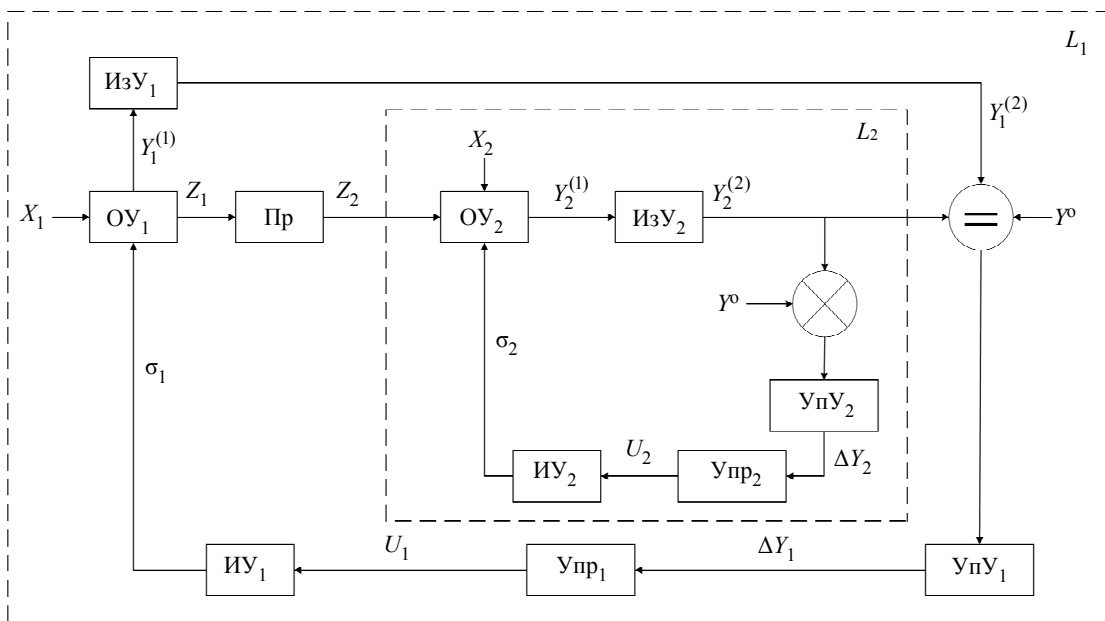


Рис. 1. Структурная схема «Замкнутая система управления «Природа–Техногеника» для предприятий источников энергии и промышленных предприятий»

Fig. 1. Block diagram of «Nature–Technology» closed-loop control system of production and power enterprises

образователи;  $L_1$  – контур из операторов системы управления ПИЭ;  $Y_1^{(1)}, Y_1^{(2)}, Y_2^{(1)}, Y_2^{(2)}, \Delta Y_1, \Delta Y_2$  – выбросы как регулируемые переменные и ошибки регулирования, возникающие в ПИЭ и ПП; ИзУ<sub>2</sub> – измерительные устройства ПП; ОУ<sub>2</sub> – объект управления в ПП; ИУ<sub>2</sub> – исполнительные устройства ПП; Упр<sub>2</sub> – закон управления по выбросам ПП; УпУ<sub>2</sub> – устройства управления в ПП;  $L_2$  – контур из операторов системы управления ПП;  $Y^0$  – максимально допустимая ошибка по выбросам;  $U_1, U_2$  – сигналы управления выбросами ПИЭ и ПП;  $X_1$  – топливо (уголь после дробления или другого вида подготовки);  $X_2$  – сырье (ПП), например после агломерации «шихты» в сталелитейном производстве;  $Z_1$  – поток энергии с выхода ПИЭ;  $Z_2$  – поток энергии, преобразованный для ПП;  $\sigma_1, \sigma_2$  – компенсирующие воздействия исполнительных устройств.

Векторно-матричная математическая модель включает следующие векторы и матрицы:

$$\begin{aligned} Y_1^{(1)} &= S_{1 \text{ ОУ}1} \sigma_1; Z_1 = S_{1 \text{ ОУ}1} X_1; \\ Y_1^{(2)} &= K_{1 \text{ ИзУ}1} Y_1^{(1)}; \\ \Delta Y_1 &= F_{1 \text{ УпУ}1} (Y_1^{(2)} + Y_2^{(2)} - Y_0); \\ U_1 &= G_{\text{PID}1 \text{ Упр}1} \Delta Y_1; \sigma_1 = H_{1 \text{ ИУ}1} U_1; \\ Y_2^{(1)} &= S_{2 \text{ ОУ}2} \sigma_2; Z_2 = V_{\text{Пр}} Z_1; \\ Y_2^{(2)} &= K_{2 \text{ ИзУ}2} Y_2^{(1)}; \Delta Y_2 = F_{2 \text{ УпУ}2} (Y_2^{(2)} - Y_0); \\ U_2 &= G_{\text{PID}2 \text{ Упр}2} \Delta Y_2; \sigma_2 = H_{2 \text{ ИУ}2} U_2; \\ L_{1 \sigma_1, Y_1^{(2)}} &= K_{1 \text{ ИзУ}1} S_{1 \text{ ОУ}1} \times \\ &\times \{I - K_{1 \text{ ИзУ}1} S_{1 \text{ ОУ}1} H_{1 \text{ ИУ}1} \times \\ &\times G_{\text{PID}2 \text{ Упр}2} F_{1 \text{ УпУ}1}\}^{-1}; \\ L_{2 \sigma_2, Y_2^{(2)}} &= K_{2 \text{ ИзУ}2} S_{2 \text{ ОУ}2} \times \\ &\times \{I - K_{2 \text{ ИзУ}2} S_{2 \text{ ОУ}2} H_{2 \text{ ИУ}2} \times \\ &\times G_{\text{PID}2 \text{ Упр}2} F_{2 \text{ УпУ}2}\}^{-1}; \\ L_{1 \sigma_1, \Delta Y_1} &= K_{1 \text{ ИзУ}1} S_{1 \text{ ОУ}1} F_{1 \text{ УпУ}1} \times \\ &\times \{I - K_{1 \text{ ИзУ}1} S_{1 \text{ ОУ}1} H_{1 \text{ ИУ}1} \times \\ &\times G_{\text{PID}1 \text{ Упр}1} F_{1 \text{ УпУ}1}\}^{-1}; \\ L_{2 \sigma_2, \Delta Y_2} &= K_{2 \text{ ИзУ}2} S_{2 \text{ ОУ}2} F_{2 \text{ УпУ}2} \times \\ &\times \{I - K_{2 \text{ ИзУ}2} S_{2 \text{ ОУ}2} H_{2 \text{ ИУ}2} \times \\ &\times G_{\text{PID}2 \text{ Упр}2} F_{2 \text{ УпУ}2}\}^{-1}, \end{aligned}$$

где  $I$  – единичная матрица.

Все векторы и матрицы представляются в метрике Евклидова пространства  $E_{n,n}$ .

Обозначения матриц и векторов отдельных звеньев в структуре «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» имеют следующий вид:

ПИЭ –

$$S_{1 \text{ ОУ}1} = S_1^{ij}(p); V_{\text{Пр}} = V_{ij}(p);$$

$$K_{1 \text{ ИзУ}1} = K_1^{ij}(p); F_{1 \text{ УпУ}1} = F_1^{ij}(p);$$

$$G_{\text{PID}1 \text{ Упр}1} = G_{\text{PID}1}^{ij}(p); H_{1 \text{ ИУ}1} = H_1^{ij}(p); \\ i, j = 1, 2, \dots, n;$$

ПП –

$$S_{2 \text{ ОУ}2} = S_2^{ij}(p);$$

$$K_{2 \text{ ИзУ}2} = K_2^{ij}(p); F_{2 \text{ УпУ}2} = F_2^{ij}(p);$$

$$G_{\text{PID}2 \text{ Упр}2} = G_{\text{PID}2}^{ij}(p); H_{2 \text{ ИУ}2} = H_2^{ij}(p); \\ i, j = 1, 2, \dots, n. \\ p \equiv j\omega,$$

где  $p$  – комплексные переменные;  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – угловая частота колебаний:

$$S_1^{ij}(p); S_2^{ij}(p); V_{ij}(p); K_1^{ij}(p); K_2^{ij}(p); F_1^{ij}(p); F_2^{ij}(p);$$

$$G_{\text{PID}1}^{ij}(p); G_{\text{PID}2}^{ij}(p); H_1^{ij}(p); H_2^{ij}(p)$$

– многомерные матричные выражения, соответствующие каждому матричному модулю в системе.

Раскрывая приведенные матрицы и векторы, получим в контуре  $L_2(p)$ :

ОУ<sub>2</sub> –

$$Y_2^{(1)} = \begin{bmatrix} y_{21}^{(1)} \\ y_{22}^{(1)} \\ \vdots \\ y_{2n}^{(1)} \end{bmatrix} = S_2(p) X_2 =$$

$$= \begin{bmatrix} s_1^{11}(p) & s_1^{12}(p) & \dots & s_1^{1n}(p) \\ s_1^{21}(p) & s_1^{22}(p) & \dots & s_1^{2n}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_1^{n1}(p) & s_1^{n2}(p) & \dots & s_1^{nn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ \vdots \\ x_{2n} \end{bmatrix};$$

Пр –

$$Z_2 = \begin{bmatrix} z_2^1 \\ z_2^2 \\ \vdots \\ z_2^n \end{bmatrix} = V(p) Z_1 =$$

$$= \begin{bmatrix} v_{11}(p) & v_{12}(p) & \dots & v_{1n}(p) \\ v_{21}(p) & v_{22}(p) & \dots & v_{2n}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{n1}(p) & v_{n2}(p) & \dots & v_{nn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1^1 \\ z_1^2 \\ \vdots \\ z_1^n \end{bmatrix};$$

ИЗУ<sub>2</sub> –

$$\mathbf{Y}_2^{(2)} = \begin{bmatrix} y_{21}^{(2)} \\ y_{22}^{(2)} \\ \vdots \\ y_{2n}^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2(\mathbf{p})\mathbf{Y}_2^{(1)} =$$

$$= \begin{bmatrix} k_2^{11}(p) & k_2^{12}(p) & \cdots & k_2^{1n}(p) \\ k_2^{21}(p) & k_2^{22}(p) & \cdots & k_2^{2n}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_2^{n1}(p) & k_2^{n2}(p) & \cdots & k_2^{nn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{21}^{(1)} \\ y_{22}^{(1)} \\ \vdots \\ y_{2n}^{(1)} \end{bmatrix};$$

УП<sub>2</sub> –

$$\Delta\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} \Delta y_2^1 \\ \Delta y_2^2 \\ \vdots \\ \Delta y_2^n \end{bmatrix} = \mathbf{F}_2(\mathbf{p})(\mathbf{Y}_2^{(2)} - \mathbf{Y}^0) =$$

$$= \begin{bmatrix} f_2^{11}(p) & f_2^{12}(p) & \cdots & f_2^{1n}(p) \\ f_2^{21}(p) & f_2^{22}(p) & \cdots & f_2^{2n}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_2^{n1}(p) & f_2^{n2}(p) & \cdots & f_2^{nn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{21}^{(2)} - y_1^0 \\ y_{22}^{(2)} - y_2^0 \\ \vdots \\ y_{2n}^{(2)} - y_n^0 \end{bmatrix} =$$

$$= \text{diag} \left( \frac{M_2^1}{1 + \lambda_2^1 p}, \frac{M_2^2}{1 + \lambda_2^2 p}, \dots, \frac{M_2^n}{1 + \lambda_2^n p} \right) \times$$

$$\times \begin{bmatrix} J_2^{11} & J_2^{12} & \cdots & J_2^{1n} \\ J_2^{21} & J_2^{22} & \cdots & J_2^{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_2^{n1} & J_2^{n2} & \cdots & J_2^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{21}^{(2)} - y_1^0 \\ y_{22}^{(2)} - y_2^0 \\ \vdots \\ y_{2n}^{(2)} - y_n^0 \end{bmatrix};$$

Упр<sub>2</sub> –

$$\mathbf{G}_{\text{PID}2}^{ij}(\mathbf{p}) = \mathbf{a}_{\text{P}2}^{ij} + \mathbf{a}_{\text{I}2}^{ij} p^{-1} + \mathbf{a}_{\text{D}2}^{ij}, \quad p, i, j = 1, 2, \dots, n;$$

$$\mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} u_2^1 \\ u_2^2 \\ \vdots \\ u_2^n \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{\text{PID}2}(\mathbf{p})\Delta\mathbf{Y}_2 =$$

$$= \begin{bmatrix} g_{\text{PID}2}^{11}(p) & g_{\text{PID}2}^{12}(p) & \cdots & g_{\text{PID}2}^{1n}(p) \\ g_{\text{PID}2}^{21}(p) & g_{\text{PID}2}^{22}(p) & \cdots & g_{\text{PID}2}^{2n}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{\text{PID}2}^{n1}(p) & g_{\text{PID}2}^{n2}(p) & \cdots & g_{\text{PID}2}^{nn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_2^1 \\ \Delta y_2^2 \\ \vdots \\ \Delta y_2^n \end{bmatrix}.$$

ИУ<sub>2</sub> –

$$\boldsymbol{\sigma}_2 = \begin{bmatrix} \sigma_2^1 \\ \sigma_2^2 \\ \vdots \\ \sigma_2^n \end{bmatrix} = \mathbf{H}_2(\mathbf{p})\mathbf{U}_2 =$$

$$= \begin{bmatrix} h_2^{11}(p) & h_2^{12}(p) & \cdots & h_2^{1n}(p) \\ h_2^{21}(p) & h_2^{22}(p) & \cdots & h_2^{2n}(p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_2^{n1}(p) & h_2^{n2}(p) & \cdots & h_2^{nn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2^1 \\ u_2^2 \\ \vdots \\ u_2^n \end{bmatrix}.$$

Аналогично строятся математические модели для контура  $L_1(p)$  при условии включения в него контура  $L_2(p)$  как внутреннего звена. В дальнейшем будем исходить из условия определения двух основных составляющих выбросов ПИЭ и ПП –  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$ , поэтому метрика в математической модели «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» будет  $n = 2$ . Ввиду существенно меньшей инерционности  $L_2(p)$  по отношению к  $L_1(p)$  [4], предлагается подход к синтезу управлений ПИЭ и ПП как каскадной САУ [5]. В соответствии с этим подходом проведем вначале синтез управлений для внутреннего контура  $L_2(p)$ . Соответствующие векторы и матрицы в контуре  $L_2(p)$  при  $n = 2$  имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_2 = [x_{21}, x_{22}]^T; \\ \boldsymbol{\sigma}_2 = [\sigma_{21}, \sigma_{22}]^T; \\ \mathbf{Z}_2 = [z_{21}, z_{22}]^T; \\ \mathbf{Y}_2^{(1)} = [y_{21}^{(1)}, y_{22}^{(1)}]^T; \\ \mathbf{Y}_2^{(2)} = [y_{21}^{(2)}, y_{22}^{(2)}]^T; \\ \mathbf{Y}^0 = [y_1^0, y_2^0]^T; \\ \Delta\mathbf{Y}_2 = [\Delta y_{21}, \Delta y_{22}]^T; \\ \mathbf{U}_2 = [u_{21}, u_{22}]^T. \end{array} \right.$$

В качестве критерия параметрического синтеза управлений в  $L_2(p)$  (ПП) примем минимизацию ошибки регулирования  $\Delta\mathbf{Y}_2$ , выбросов загрязняющих веществ  $\mathbf{Y}_2^{(2)}$  в виде функционала:

$$\min_{\alpha_{\text{P}2}, \alpha_{\text{I}2}, \alpha_{\text{D}2}} \left\{ \int_0^T [\Delta Y_2(t)]^2 dt \right\}. \quad (1)$$

Структуру управлений принимаем в виде ПИД-регуляторов. Решение задачи параметрического синтеза ПИД-регуляторов сводится к определению значений параметров  $\alpha_{P2}$ ,  $\alpha_{I2}$ ,  $\alpha_{D2}$  в соответствии с функционалом (1), в законе управления ПИД-регуляторов в контуре  $L_2(p)$ :

$$U_2 = \alpha_{P2} \Delta Y_2(t) + \alpha_{I2} \int \Delta Y_2(t) dt + \alpha_{D2} \frac{d}{dt} \Delta Y_2(t),$$

где  $\alpha_{P2}$ ,  $\alpha_{I2}$ ,  $\alpha_{D2}$  – коэффициенты ПИД-регуляторов, зависящие от соответствующих параметров  $OY_2$ ,  $IЗУ_2$ ,  $УПУ_2$ ,  $ИУ_2$ . Аналогично проводится параметрический синтез управлений для  $U_1$  в контуре  $L_1(p)$ , но с включением в этот контур передаточной полиномиальной матрицы с синтезированным управлением контура  $L_2(p)$  –  $W_{T2}(p)$ , где  $W_{T2}(p)$  – полиномиальная матрица из передаточных функций по ошибке  $\Delta Y_2$  (рис. 2), в составляющей  $Упр_2$  которой содержатся  $\alpha_{P2}$ ,  $\alpha_{I2}$ ,  $\alpha_{D2}$  подлежащие определению.

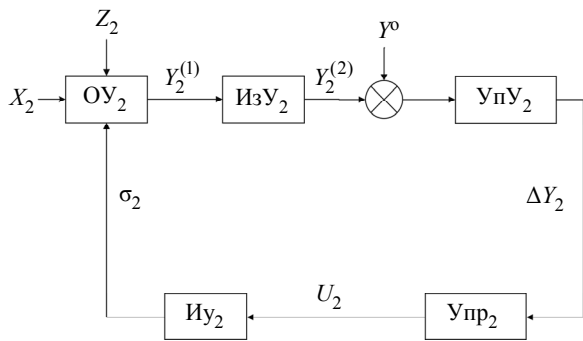


Рис. 2. Структурная схема «Замкнутая система управления «Природа–Техногеника» для предприятий источников энергии и промышленных предприятий»  
Fig. 2. Block diagram of the «Nature–Technology» closed-loop control system of production and power enterprises

Как видно из рис. 2,

$$W_{T2}(p) = \frac{Y_2^{(2)}}{X_2} = K_2 IЗУ_2 S_2 OY \{ I + K_2 IЗУ_2 \times S_2 OY H_2 ИУ_2 G_{PID2} Упр_2 F_2 УПУ_2 \}^{-1}. \quad (2)$$

Замкнутая система управления «Природа–Техногеника» для предприятий источников энергии и промышленных предприятий.

Поскольку в данной статье рассматриваются составляющие вектора выбросов,  $Y_2$  –  $NO_x$ ,  $CO_2$ , то для конкретного решения задачи требуется определиться с исполнительными устройствами. Примем здесь ПП в виде сталелитейного предприятия, тогда физические процессы  $ИУ_2$ , в частности, по  $NO_x$ , сводятся к следующему [6]:

1) измерение концентрации  $NO_x$  на выходе, в соответствии с требованиями по выбросам,  $Y_0$ ;

2) компенсация  $NO_x$  через  $ИУ_2$  впрыскиваемым в составе  $\sigma_2$  аммиака;

3) построение системы регулирования с  $ИУ_2$  в контуре  $L_2(p)$ .

В настоящее время большинство аналогичных предприятий используют технологию селективной каталитической нейтрализации (Selective Catalytic Reduction, SCR) для борьбы с  $NO_x$ . Количество распыляемого аммиака – это важный показатель такой технологии слишком малое количество аммиака снижает эффективность денитрификации, а слишком большое количество аммиака приводит к трате аммиака и вторичному загрязнению. Существует два основных способа регулирования впрыска аммиака: регулирование соотношения аммиака и азота в агрегат  $ИУ_2$  и регулирование фиксированного содержания  $NO_x$  в дымовых газах. В данной статье предполагается второй способ работы  $ИУ_2$  в соответствии с минимизацией ошибки  $\Delta Y_2$  (содержания  $NO_x$ ) на выходе из системы [6].

Воздействие  $Z_2$  от ПИЭ к ПП получается через преобразование Пр в структуре «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» (рис. 1). В общем виде переход от ПИЭ к ПП представлен на рис. 3 [7].

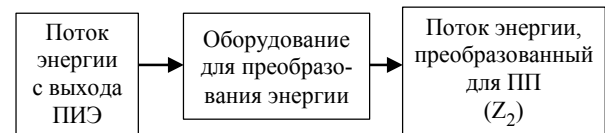


Рис. 3. Схема потоков энергии в предприятии-источнике энергии  
Fig. 3. Scheme of power flows within power enterprises

Математическая модель Пр имеет вид

$$Z_2 = V(p)Z_1,$$

где  $V(p) = \begin{bmatrix} v_{11}(p) & 0 \\ 0 & v_{22}(p) \end{bmatrix}$  – матрица коэффициентов преобразования потоков в энергии.

Математическую модель модуля преобразования сырья  $X_2$  в выбросы загрязняющих веществ  $Y_2^{(1)}$  представим в виде

$$Y_2^{(1)} = S_2(p)X_2, \quad (3)$$

где  $S_2(p) = \begin{bmatrix} s_2^{11}(p) & 0 \\ 0 & s_2^{22}(p) \end{bmatrix}$  – передаточная функция между  $X_2$  и выбросами  $Y_2^{(1)}$ . Математические

модели звеньев в  $L_2(p)$ , обычно применяемые в промышленных средствах по минимизации выбросов, известны [8]. Рассмотрим эти модели последовательно согласно структуре  $L_2(p)$  (рис. 2).

Математическая модель ИзУ<sub>2</sub> имеет вид

$$\mathbf{Y}_2^{(2)} = \mathbf{K}_2(\mathbf{p})\mathbf{Y}_2^{(1)}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{K}_2(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} k_2^{11}(p) & 0 \\ 0 & k_2^{22}(p) \end{bmatrix}$  – диагональная

матрица значений концентрации различных загрязняющих веществ на выходе выброса. Значения концентрации зависят от массы загрязняющих веществ, образующихся в единицу времени.

Математическая модель УпУ<sub>2</sub> имеет вид

$$\Delta\mathbf{Y}_2 = \mathbf{F}_2(\mathbf{p})(\mathbf{Y}_2^{(2)} - \mathbf{Y}^0) = \mathbf{R}_2\mathbf{J}_2(\mathbf{Y}_2^{(2)} - \mathbf{Y}^0), \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_2(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} f_2^{11} & 0 \\ 0 & f_2^{22} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} R_2^{11} & 0 \\ 0 & R_2^{22} \end{bmatrix} = \\ = \text{diag} \left( \frac{M_2^1}{1 + \lambda_2^1 p}, \frac{M_2^2}{1 + \lambda_2^2 p} \right), \mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} J_2^{11} & J_2^{12} \\ J_2^{21} & J_2^{22} \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{R}_2$  – фильтры нижних частот с усилением сигнала;  $M_2^i$  – коэффициент усиления сигналов в фильтрах,  $M_2^i = M_{v2}^i M_{s2}^i$ , где  $M_{v2}^i$  – средний расход газообразных загрязняющих веществ в трубе,  $M_{s2}^i$  – площадь поперечного сечения трубы;  $\lambda_2^i$  – регулируемый параметр фильтра нижних частот. Поскольку постоянная фильтра связана только с временем запаздывания ( $\tau$ ) системы, ее можно выразить как зависимость от пропорционального значения  $\lambda/\tau$ ; после проверки соответствующей информации выяснилось [9], [10], что удержание значения этого коэффициента на уровне 1.5...2.0 позволяет повысить устойчивость и робастность системы;  $\mathbf{J}_2$  – весовой коэффициент для каждого канального фильтра, в системе управления, разработанной в данной статье, каждый канал при прохождении через модуль фильтрации является независимым,  $\mathbf{J}_2 = \mathbf{I}$ .

Перейдем к параметрическому синтезу Упр<sub>2</sub>. В данной статье в качестве структуры модуля управления системой выбран ПИД-регулятор. Существуют различные методы синтеза параметров ПИД-регулятора – такие, как метод настройки параметров Ziegler–Nichols, ISTE, метод рас-

ширенного критического отношения, метод кривой ступенчатого отклика [11], [12].

Среди них метод синтеза параметров Ziegler–Nichols на основе теоремы Парсевала [13] представляется предпочтительным. В этом случае приведенный функционал (1) применительно к упр<sub>2</sub> в контуре  $L_2(p)$  преобразуется через передаточные функции по ошибке регулирования:

$$\min_{\alpha_{p2}, \alpha_{i2}, \alpha_{D2}} \left\{ \int_{-j\omega}^{+j\omega} W_{T2}(p)W_{T2}(-p)dp \right\},$$

по отношению к единичному возмущению

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} 1/p \\ 1/p \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Конкретные шаги по этому методу [11], [12] следующие:

1. Оцениваются характеристики замкнутого контура системы при пропорциональном управлении.
2. Оценивается предельный коэффициент –  $K_{p2}$  по критерию Раута.
3. Определяется период колебаний –  $T_{c2}$  при предельном коэффициенте  $K_{p2}$ .
4. Рассчитываются параметры ПИД-регулятора в соответствии с табл. 1.
5. Выполняется корректировка параметров ПИД-регулятора  $\alpha_{p2}$ ,  $\alpha_{i2}$ ,  $\alpha_{D2}$  в соответствии с критерием (1).

Расчет параметров регулятора приведен в табл. 1.

Табл. 1. Расчет параметров регулятора  
Tab. 1. Calculating of controller parameters

Тип регулятора	$\alpha_{p2}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{D2}$
P	$0.50K_{p2}$	–	–
PI	$0.45K_{p2}$	$\frac{\alpha_{p2}}{0.85 \times T_{c2}}$	–
PD	$0.80K_{p2}$	–	$0.12\alpha_{p2}T_{c2}$
PID	$0.60K_{p2}$	$\frac{\alpha_{p2}}{0.85 \times T_{c2}}$	$0.12\alpha_{p2}T_{c2}$

Соответствующие выражения для  $\mathbf{U}_2$ ,  $\Delta\mathbf{Y}_2$  и Упр<sub>2</sub> имеют вид

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{G}_{PID2}(\mathbf{p})\Delta\mathbf{Y}_2, \quad (6)$$

Упр<sub>2</sub> –

$$\mathbf{G}_{PID2}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} g_{PID2}^{11}(p) & 0 \\ 0 & g_{PID2}^{22}(p) \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \alpha_{p2}^{11} + \alpha_{i2}^{11}p^{-1} + \alpha_{D2}^{11}p & 0 \\ 0 & \alpha_{p2}^{22} + \alpha_{i2}^{22}p^{-1} + \alpha_{D2}^{22}p \end{bmatrix}.$$

Исполнительное устройство в контуре  $L_2(p)$  строится на технологии нейтрализации загрязняющих веществ для компенсации  $\text{NO}_x$  [14]. Математическая модель ИУ<sub>2</sub> имеет вид

$$\sigma_2 = \mathbf{H}_2(\mathbf{p})\mathbf{U}_2, \quad (7)$$

где  $\mathbf{H}_2(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} h_2^{11} & 0 \\ 0 & h_2^{22} \end{bmatrix}$  – передаточная функция

массовой концентрации загрязняющего вещества в составе  $\sigma_2$  на выходе из системы после нейтрализации загрязняющего вещества.

Передаточные функции в полиномиальной матрице  $\mathbf{W}_{T2}(\mathbf{p})$  имеют вид

$$W_{T2ij}(p) = \frac{b_{z_2} p^{z_2} + b_{z_2-1} p^{z_2-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_{r_2} p^{r_2} + a_{r_2-1} p^{r_2-1} + \dots + a_1 p + a_0},$$

где  $z_2, r_2$  – порядки входов и выходов в передаточной функции,  $z_2 \leq r_2$ ;  $a_{r_2}, a_{r_2-1}, \dots, a_1, a_0$ ;  $b_{z_2}, b_{z_2-1}, \dots, b_1, b_0$  – коэффициенты в передаточной функции.

В применении к двумерным системам и рассматривая  $\mathbf{X}_2$  как единичную функцию  $\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} 1/p \\ 1/p \end{bmatrix} \Leftarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ , получим:

$$\mathbf{W}_{T2}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} w_{T2}^{11} & 0 \\ 0 & w_{T2}^{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b_{z_2}^{11} p^{z_2} + b_{z_2-1}^{11} p^{z_2-1} + \dots + b_1^{11} p + b_0^{11}}{a_{r_2}^{11} p^{r_2} + a_{r_2-1}^{11} p^{r_2-1} + \dots + a_1^{11} p + a_0^{11}} & 0 \\ 0 & \frac{b_{z_2}^{22} p^{z_2} + b_{z_2-1}^{22} p^{z_2-1} + \dots + b_1^{22} p + b_0^{22}}{a_{r_2}^{22} p^{r_2} + a_{r_2-1}^{22} p^{r_2-1} + \dots + a_1^{22} p + a_0^{22}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y}_2^{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{b_{z_2}^{11} p^{z_2} + b_{z_2-1}^{11} p^{z_2-1} + \dots + b_1^{11} p + b_0^{11}}{a_{r_2}^{11} p^{r_2} + a_{r_2-1}^{11} p^{r_2-1} + \dots + a_1^{11} p + a_0^{11}} \\ \frac{b_{z_2}^{22} p^{z_2} + b_{z_2-1}^{22} p^{z_2-1} + \dots + b_1^{22} p + b_0^{22}}{a_{r_2}^{22} p^{r_2} + a_{r_2-1}^{22} p^{r_2-1} + \dots + a_1^{22} p + a_0^{22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ p \\ 1 \\ p \end{bmatrix}. \quad (8)$$

С другой стороны, в соответствии с выражениями (2)–(7) выходной сигнал  $\mathbf{Y}_2^{(2)}$  имеет вид:

$$\mathbf{Y}_2^{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{k_2^{11}(p)s_2^{11}(p)}{1 + h_2^{11}(p)g_{\text{PID}2}^{11}(p)f_2^{11}(p)k_2^{11}(p)s_2^{11}(p)} \\ \frac{k_2^{22}(p)s_2^{22}(p)}{1 + h_2^{22}(p)g_{\text{PID}2}^{22}(p)f_2^{22}(p)k_2^{22}(p)s_2^{22}(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ p \\ 1 \\ p \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Сравнивая выражения (8) и (9), найдем:

$$\begin{cases} b_{z_2}^{11} p^{z_2} + b_{z_2-1}^{11} p^{z_2-1} + \dots + b_1^{11} p + b_0^{11} = \\ = k_2^{11}(p)s_2^{11}(p), \\ b_{z_2}^{22} p^{z_2} + b_{z_2-1}^{22} p^{z_2-1} + \dots + b_1^{22} p + b_0^{22} = \\ = k_2^{22}(p)s_2^{22}(p), \\ a_{r_2}^{11} p^{r_2} + a_{r_2-1}^{11} p^{r_2-1} + \dots + a_1^{11} p + a_0^{11} = \\ = 1 + h_2^{11}(p)g_{\text{PID}2}^{11}(p)f_2^{11}(p)k_2^{11}(p)s_2^{11}(p), \\ a_{r_2}^{22} p^{r_2} + a_{r_2-1}^{22} p^{r_2-1} + \dots + a_1^{22} p + a_0^{22} = \\ = 1 + h_2^{22}(p)g_{\text{PID}2}^{22}(p)f_2^{22}(p)k_2^{22}(p)s_2^{22}(p). \end{cases} \quad (10)$$

Как следует из (10), параметры ПИД-регулятора  $g_{\text{PID}2}^{11}(p), g_{\text{PID}2}^{22}(p)$  –  $\alpha_{p2}, \alpha_{I2}, \alpha_{D2}$  – Упр<sub>2</sub> зависят от параметров ОУ<sub>2</sub>, ИзУ<sub>2</sub>, УП<sub>2</sub>, ИУ<sub>2</sub>.

Параметры  $\alpha_{p2}, \alpha_{I2}, \alpha_{D2}$  в синтезируемом управлении определяются на основе генетического алгоритма [15], [16]. Конкретные шаги этого алгоритма следующие:

1. Кодирование параметров  $\alpha_{p2}, \alpha_{I2}, \alpha_{D2}$ .
2. Начальные значения генерируются в виде случайных величин.
3. Каждый набор параметров декодируется по функционалу (1).

4. Выбор оцененных наборов параметров ПИД-регулятора в следующее поколение.

5. Выполняются операции коррекции отобранных наборов параметров.

6. Повторяются шаги с 3 по 5 до тех пор, пока не будет выполнено условие (1).

После параметрического синтеза с помощью генетического алгоритма проводится моделирование во всей замкнутой системы  $L_2(p)$  для окончательной регулировки параметров.

В качестве примера рассмотрим параметрический синтез управлений в  $L_2(p)$  ПП сталеплавильного завода в Китае, основные загрязняющие вещества в выбросах которого – это  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  [17], [18]. Другие необходимые характеристики были приняты согласно стандартам выбросов загрязняющих веществ в Китае и РФ. Для загрязняющих веществ  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  коэффициенты преобразования сигналов  $Z_2$ , поступающих от ПИЭ, приведены в табл. 2.

Табл. 2. Преобразования загрязняющих веществ  
 Tab. 2. Transformations of pollutants

Предприятия	Загрязняющие вещества	Коэффициент преобразования	Единица измерения
ПИЭ с угольным топливом	NO <sub>x</sub>	5.77	кг/т (уголь)
	CO <sub>2</sub>	2860	кг/т (уголь)
ПП с выплавкой железной руды	NO <sub>x</sub>	0.35	кг/т (железная руда)
	CO <sub>2</sub>	825	кг/т (железная руда)

Табл. 3. Передаточные функции звеньев в L<sub>2</sub>(p)  
 Tab. 3. Transfer functions of links in L<sub>2</sub>(p)

Передаточные функции звеньев L <sub>2</sub> (p)	$Y_2^{(2)}(\text{NO}_x)/X_2$	$Y_2^{(2)}(\text{CO}_2)/X_2$
G <sub>2</sub> (p)	$g_2^{11} = 1000/1$	$g_2^{22} = 15\,000/1$
K <sub>2</sub> (p)	$k_2^{11} = 1/2.5$	$k_2^{22} = 1/2.5$
F <sub>2</sub> (p)	$f_2^{11} = \frac{1.5}{26p+1}$	$f_2^{22} = \frac{1.25}{26p+1}$
G <sub>PID2</sub> (p)	$g_{\text{PID}2}^{11} = 0.37 + 0.0012p^{-1} + 9.54p$	$g_{\text{PID}2}^{22} = 0.28 + 0.0015p^{-1} + 7.38p$
H <sub>2</sub> (p)	$h_2^{11} = \frac{1.92}{25\,600p^2 + 320p + 1}$	$h_2^{22} = \frac{1.89}{14\,400p^2 + 240p + 1}$

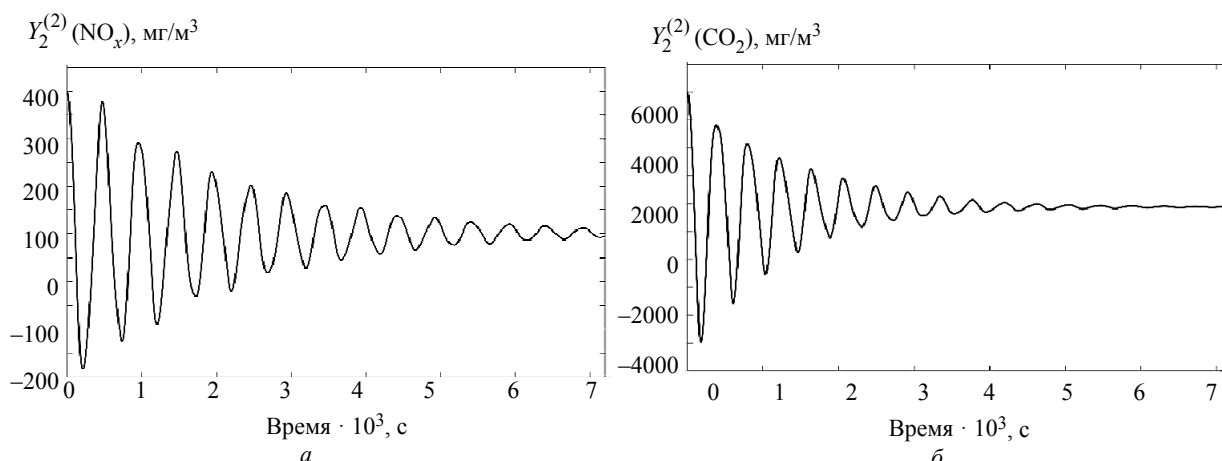


Рис. 4. Результаты моделирования  $Y_2^{(2)}$  без синтезированного управления: а – NO<sub>x</sub>; б – CO<sub>2</sub>

Fig. 4. Simulation results  $Y_2^{(2)}$  without synthesized control: а – NO<sub>x</sub>; б – CO<sub>2</sub>

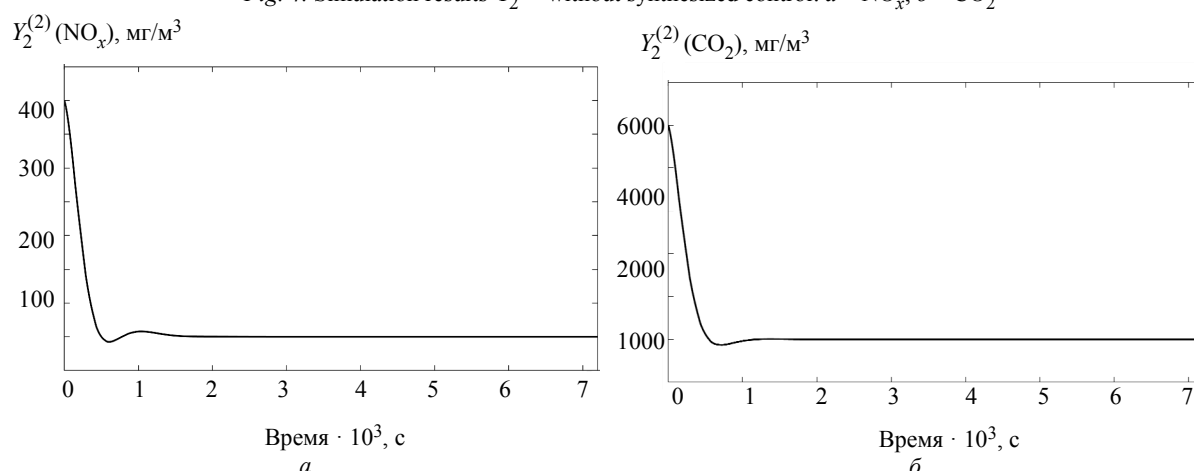


Рис. 5. Результаты моделирования  $Y_2^{(2)}$  после параметрического синтеза с ПИД-регуляторами: а – NO<sub>x</sub>; б – CO<sub>2</sub>

Fig. 5. Simulation results  $Y_2^{(2)}$  after parametric synthesis with PID controllers: а – NO<sub>x</sub>; б – CO<sub>2</sub>



Табл. 4. Передаточные функции звеньев в  $L_1(p)$   
 Tab. 4. Transfer functions of links in  $L_1(p)$

Передаточные функции звеньев $L_1(p)$	$Y_1^{(2)}(\text{NO}_x)/X_1$	$Y_1^{(2)}(\text{CO}_2)/X_1$
$G_1(p)$	$g_1^{11} = \frac{12\,500}{1}$	$g_1^{22} = \frac{175\,000}{1}$
$K_1(p)$	$k_1^{11} = \frac{1}{25}$	$k_1^{22} = \frac{1}{25}$
$F_1(p)$	$f_1^{11} = \frac{2}{26p+1}$	$f_1^{22} = \frac{1.5}{26p+1}$
$G_{\text{PID1}}(p)$	$g_{\text{PID1}}^{11} = 0.35 + 0.0019p^{-1} + 7.64p$	$g_{\text{PID1}}^{22} = 0.32 + 0.002p^{-1} + 7.56p$
$H_1(p)$	$h_1^{11} = \frac{0.57}{10\,230p^2 + 196p + 1}$	$h_1^{22} = \frac{0.73}{8100p^2 + 180p + 1}$

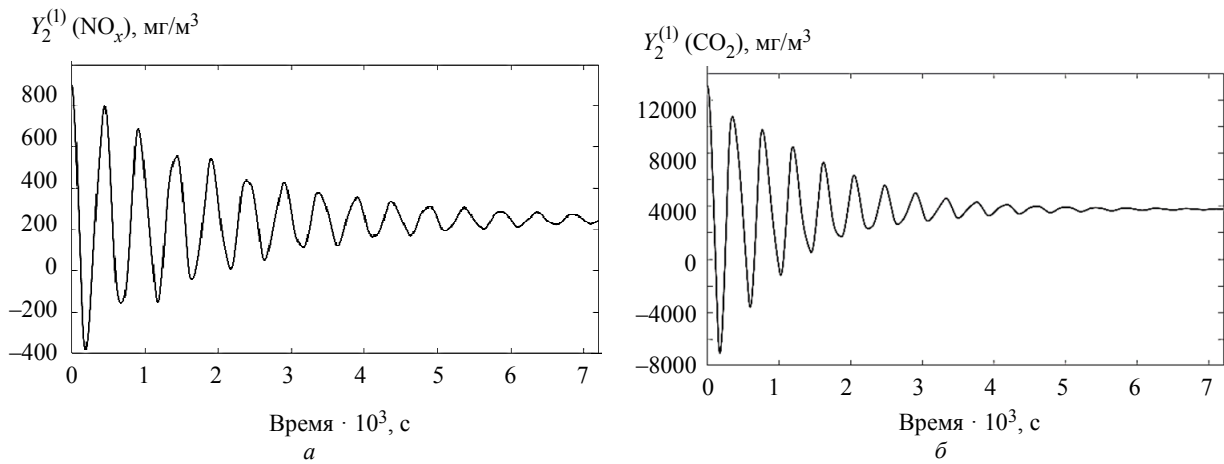


Рис. 6. Результаты моделирования  $Y_2^{(1)}$  без синтезированного управления: а –  $\text{NO}_x$ ; б –  $\text{CO}_2$

Fig. 6. Simulation results  $Y_2^{(1)}$  without synthesized control: а –  $\text{NO}_x$ ; б –  $\text{CO}_2$

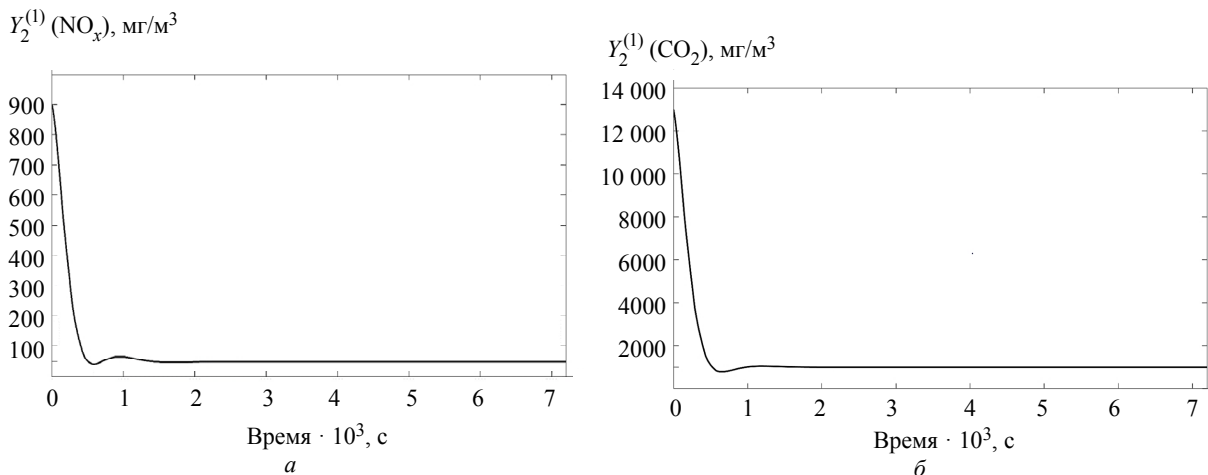


Рис. 7. Результаты моделирования  $Y_2^{(1)}$  после параметрического синтеза с ПИД-регуляторами: а –  $\text{NO}_x$ ; б –  $\text{CO}_2$

Fig. 7. Simulation results  $Y_2^{(1)}$  after parametric synthesis with PID controllers: а –  $\text{NO}_x$ ; б –  $\text{CO}_2$

В данной статье коэффициенты преобразования ПИЭ и ПП устанавливаются на основе стандартов концентрации выбросов промышленных загрязнителей; нормальные значения настроек концентрации  $\text{NO}_x$  – 50 мг/м<sup>3</sup>,  $\text{CO}_2$  – 1000 мг/м<sup>3</sup>.

Другие необходимые параметры звеньев  $L_2(p)$  приведены в табл. 3.

Моделирование по вышеуказанной модели контура  $L_2(p)$  без синтезированного управления и при наличии такого управления выполнено сред-

ствами Simulink, Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

Далее результаты параметрического синтеза управлений в контуре  $L_2(p)$ , включенные в контур  $L_1(p)$ , используются в соответствующей передаточной функции. Заменяя контур  $L_1(p)$  полиномиальной матрицей  $\mathbf{W}_{T2}(p)$  с синтезированным управлением  $\mathbf{G}_{PID2}(p)$ , перейдем к представлению остальных блоков в контуре  $L_1(p)$  и параметрическому синтезу управлений в контуре  $L_1(p)$ . Такой синтез проводится аналогично контуру  $L_2(p)$ , но с включением в управление полиномиальной передаточной матрицы  $\mathbf{W}_{T2}(p)$ .

Полиномиальная матрица для контура  $L_1(p)$  имеет вид

$$\mathbf{W}_{T1}(p) = \frac{\mathbf{Y}_1^{(2)}}{\mathbf{X}_1} = \mathbf{W}_{T2}(p) + \mathbf{K}_1 \text{ИзвУ1} \mathbf{S}_1 \text{ОУ1} \times \\ \times \left\{ \mathbf{K}_1 \text{ИзвУ1} \mathbf{S}_1 \text{ОУ1} \mathbf{H}_1 \text{ИУ1} \mathbf{G}_{PID1} \text{Упр1} \mathbf{F}_1 \text{УпУ1} \right\}^{-1}.$$

Передаточные функции в полиномиальной матрице  $n$ -го порядка  $\mathbf{W}_{T1}(p)$  имеют вид:

$$W_{T1}^{ij}(p) = \frac{d_{z_1} p^{z_1} + d_{z_1-1} p^{z_1-1} + \dots + d_1 p + d_0}{c_{r_1} p^{r_1} + c_{r_1-1} p^{r_1-1} + \dots + c_1 p + c_0},$$

где  $z_1, r_1$  – порядок входов и выходов в передаточной функции,  $z_1 \leq r_1$ ;  $c_{r_1}, c_{r_1-1}, \dots, c_1, c_0$ ;  $d_{z_1}, d_{z_1-1}, \dots, d_1, d_0$  – коэффициенты в передаточной функции.

Операции параметрического синтеза ПИД-регуляторов в  $L_1(p)$  выполняются аналогично контуру  $L_2(p)$ . Передаточные функции каждого звена в  $L_1(p)$  приведены в табл. 4.

Моделирование по вышеуказанной модели контура  $L_1(p)$  без синтезированного управления и при наличии такого управления выполнено средствами Simulink. Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7.

Как видно из рис. 4–7,  $Y_2^{(2)}, Y_1^{(2)}$ , параметрический синтез ПИД-регуляторов в системе ПИЭ-ПП обеспечивает минимизацию выбросов. Таким образом, предложенная в данной статье интегрированная система управления ПИЭ и ПП по минимизации выбросов может служить основой для практического применения в соответствующей АСУТП.

**Заключение.** Рассмотрен синтез управлений «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» на базе математических моделей макроуровня. В качестве основного критерия синтеза предложен функционал от ошибки регулирования по минимизации выбросов загрязняющих веществ. Проведен параметрический синтез «ПИД-регуляторов». Разработанная многомерная замкнутая система с синтезированными управлениями по выбросам применима при производственных взаимодействиях предприятий ПИЭ и ПП. Реализация разработанной «ЗСУПТ ПИЭ и ПП» в виде соответствующей АСУТП, обеспечит практическое решение одной из проблем устойчивого развития экологичной экономики.

#### Список литературы

1. Перспективы углеродного регулирования в России и повышение ответственности и вовлеченности предприятий в деятельность по сокращению выбросов парниковых газов / В. В. Брижанин, С. П. Киселева, Р. В. Филиппова, С. В. Остах // Вестн. РЭУ им. Г. В. Плеханова. 2023. Т. 20, № 2. С. 130–142. doi: 10.21686/2413-2829-2023-2-130-142.
2. Li Sh., Zhu P. The impact of industrial restructuring and energy consumption changes on air pollution an empirical analysis based on Shanghai input-output tables. Shanghai Economic Research, 2017. Vol. 6. P. 82–89. doi: 10.19626/j.cnki.cn31-1163/f.2017.06.010. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2017&filename=HSYJ201706010&uniplatform=OVERSEA&v=nYvl6wYVWEedwj4Yx2j\\_CVfKOGUGTaAEkYaj\\_3tC5lxxRx11Vvqr0Bm2sC8CirSe](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2017&filename=HSYJ201706010&uniplatform=OVERSEA&v=nYvl6wYVWEedwj4Yx2j_CVfKOGUGTaAEkYaj_3tC5lxxRx11Vvqr0Bm2sC8CirSe). (дата обращения: 09.08.2024).
3. Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И., Ван Лэй. Построение декарбонизирующей замкнутой системы управления «Природа–Техногеника» // Программные

4. Solnitsev R. I., Wang Lei. Modeling the interaction between energy source enterprises and industrial enterprises as «Nature-Technology» closed-loop control systems // Advances in Engin. Technol. Research. 2022. Vol. 1, no. 3. P. 746–751. doi: 10.56028/aetr.3.1.746.
5. Research on Identification Algorithm of Cascade Control System / D. Ding, Ya. Wang, W. Zhang, W. Chu // Math. Problems in Engin., 2022. Vol. 2022, iss. 1. Art. 3997081. 13 p. doi: 10.1155/2022/3997081.
6. Research on optimal control of improved linear active disturbance rejection for SCR denitrification system / Ch. Yang, Ch. Liu, Z. Wang, Chao Han // J. of Chinese Society of Power Engin., 2023. Vol. 43, no. 7. P. 893–900. doi: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.07.011. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=DONG202307011&uniplatform=OVERSEA&v=1Kq2hBlaiNjhgZlZTGP\\_jhdbIDO\\_kuqi9Dqj3gwmW7AtOYv3vyuY-D6tiprPDbT](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=DONG202307011&uniplatform=OVERSEA&v=1Kq2hBlaiNjhgZlZTGP_jhdbIDO_kuqi9Dqj3gwmW7AtOYv3vyuY-D6tiprPDbT) (дата обращения: 09.08.2024).

7. Liu X., Ge Sh. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system // Automation of Elect. Power Systems. 2020. Vol. 44, no. 8. P. 8–18. doi: 10.7500/AEPS20190523002. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=D LXT202008002&uniplatform=OVERSEA&v=F4nMUvjTbAu ZOW\\_5CFY41v1ke\\_hVBr19xArDHI4p9XKWuXO74OjBaQp0 uBNfaWk4](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=D LXT202008002&uniplatform=OVERSEA&v=F4nMUvjTbAu ZOW_5CFY41v1ke_hVBr19xArDHI4p9XKWuXO74OjBaQp0 uBNfaWk4) (дата обращения: 09.08.2024).

8. Emission reduction potential of air pollutants of thermal power industry based on carbon emission reduction target and emission standard constraint scenarios / Li Fei, Sun Xueli, Pang Bo, Zhu Fahua, Wang S, Yan Pei // Environmental Sci. 2021. Vol. 42, no. 12. P. 5563–5573. doi: 10.13227/j.hjxk.202102167. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=HJKZ202112001&uniplatform=OVERSEA&v=xQUcJGvGRRE05xzOALMZETaKo NsoWdTtgCVcLjBX5T\\_Vl6mPefZ2So1PTVBA78SE](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=HJKZ202112001&uniplatform=OVERSEA&v=xQUcJGvGRRE05xzOALMZETaKo NsoWdTtgCVcLjBX5T_Vl6mPefZ2So1PTVBA78SE) (дата обращения: 09.08.2024).

9. Harvie A. J., de Mello J. C. OLIA: An open-source digital lock-in amplifier // Frontiers in Sensors. 2023. Vol. 4. Art. 1102176. doi: 10.3389/fsens.2023.1102176.

10. Research and application of a novel feedback controller / Li Jun, Huang Weijian, Wan Wenjun, Liu Zhe // Control Theory & Appl. 2020. Vol. 37, no. 2. P. 411–422. doi: 10.7641/CTA.2019.80723.

11. Liu Y., Meng W., Ding J. Design and performance analysis of a PID-PID cascade control system // J. of Yanbian University (Natural Sci. Ed.). 2023. Vol. 49, no. 4. P. 358–365. doi: 10.16379/j.cnki.issn.1004-4353.2023.04.006. URL: <https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2024&filename=YBDZ 202304012&uniplatform=OVERSEA&v=vsYDC-IILoG19LrU bhEYleFMSmY9WXX9a1jfOwQcMjvlw3y9DlGjjv4sFAnkRd> (дата обращения: 09.08.2024).

12. Design and optimization of digitalization device of temperature control system using PID Ziegler-Nichols control in chemical engineering laboratory / C. Wiharya, H. Sungkowo, A. S. Suryandari, B. I. Kurniawan // 2<sup>nd</sup> Ann. Technol. Appl. Sci. and Eng. Conf. IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. Malang. 2021. Vol. 1073, no. 1. P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/1073/1/012051.

13. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: изд-во «Профессия», 2003. 752 с.

14. Hybrid active disturbance rejection control for denitration system based on multiobjective optimization / X. Yang, X. Cui, G. Yu, A. Gao, J. Shu, T. Zhang // Control Eng. of China. 2023. Vol. 30, no. 11. P. 2066–2074. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210613. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=JZDF202311014&uniplatform=OVERSEA&v=3yP934wYsmE\\_wstlsS8XpkfEEQs1ptdAc\\_8p jAbfhUBvAZSbo71U41HbdDWrZKY](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=JZDF202311014&uniplatform=OVERSEA&v=3yP934wYsmE_wstlsS8XpkfEEQs1ptdAc_8p jAbfhUBvAZSbo71U41HbdDWrZKY) (дата обращения: 09.08.2024).

15. Fu Z., Zhuan X. PID parameter selftuning algorithm based on neural network and genetic algorithm // Eng. J. of Wuhan University. 2023. Vol. 56, no. 3. P. 379–386. doi: 10.14188/j.1671-8844.2023-03-015. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=WSD202303015&uniplatform=OVERSEA&v=IO7RktlMFile-gZ9k-jf\\_iU9vgyt5hhFrHwhEHMwSylr7ts6x9RkWr3QeAKdX47](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=WSD202303015&uniplatform=OVERSEA&v=IO7RktlMFile-gZ9k-jf_iU9vgyt5hhFrHwhEHMwSylr7ts6x9RkWr3QeAKdX47) (дата обращения: 09.08.2024).

16. Zhang Li, Sheng Q., Zhu Ch. Research on carbon dioxide emission control technology of rural thermal power generating units – based on genetic evolution and PID control // J. of Agricultural Mechanization Research. 2023. Vol. 45, no. 4. P. 260–264. doi: 10.13427/j.cnki.njyi.2023.04.044. (URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=NJYJ202304043&uniplatform=OVERSEA&v=t Liez38RgndCG-WwGq2xvGjqMzUbVqmqxwskw4xRqU3iU8 kNsmZ9\\_KHq62-TyAjQ](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=NJYJ202304043&uniplatform=OVERSEA&v=t Liez38RgndCG-WwGq2xvGjqMzUbVqmqxwskw4xRqU3iU8 kNsmZ9_KHq62-TyAjQ)) (дата обращения: 09.08.2024).

17. Composite cascade control based on reinforcement learning for a SCR denitrification system / H. Chen, X. Jia, X. Sun, P. Hou // J. of China Society of Power Eng. 2022. Vol. 42, no. 5. P. 421–428. doi: 10.19805/j.cnki.jcspe.2022.05.005. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=DONG202205005&uniplatform=OVERSEA&v=IUBYZfQPa\\_gjyrtjB2fXP2zXg8IAaAnj7tX6MSruA2YjvXFJonno7bTyWUNlpElaD](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=DONG202205005&uniplatform=OVERSEA&v=IUBYZfQPa_gjyrtjB2fXP2zXg8IAaAnj7tX6MSruA2YjvXFJonno7bTyWUNlpElaD) (дата обращения: 09.08.2024).

18. Multi-model switching DMC-PID cascade predictive control for SCR flue gas denitrification system / Pengfei Hou, Xinchun Jia, Jianyun Bai, Qi Wang // Control Engin. of China. 2020. Vol. 27, no. 2. P. 355–360. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.20190308. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=JZDF202002022&uniplatform=OVERSEA&v=7yRYsnHSNagFAJPFd44B5KI9vx\\_qPO-I5vzk IRD9SobftG38u8waYzJHT41161Ff](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=JZDF202002022&uniplatform=OVERSEA&v=7yRYsnHSNagFAJPFd44B5KI9vx_qPO-I5vzk IRD9SobftG38u8waYzJHT41161Ff) (дата обращения: 09.08.2024).

---

#### Информация об авторах

**Сольников Ремир Иосифович** – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [remira70@mail.ru](mailto:remira70@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-0415-6382>

**Ван Лэй** – аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [18361206765@163.com](mailto:18361206765@163.com)

## References

1. Perspektivy uglerodnogo regulirovaniya v Rossii i povyshenie otvetstvennosti i вовлеченности predpriyatij v dejatel'nost' po sokrashheniju vybrosov parnikovyh gazov / V. V. Brizhanin, S. P. Kiseleva, R. V. Filippova, S. V. Ostah // Vestn. RJeU im. G. V. Plehanova. 2023. T. 20, № 2. S. 130–142. doi: 10.21686/2413-2829-2023-2-130-142. (In Russ.).
2. Li Sh., Zhu P. The impact of industrial restructuring and energy consumption changes on air pollution an empirical analysis based on Shanghai input-output tables // Shanghai Economic Research, 2017. Vol. 6. P. 82–89. doi: 10.19626/j.cnki.cn31-1163/f.2017.06.010. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2017&filename=HSYJ201706010&uniplatform=OVERSEA&v=nYvI6wYVWEedwj4Yx2j\\_CVfKO GUGTaAEkYaj\\_3tC5IxxRxI1Vvqr0Bm2sC8CirSe](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2017&filename=HSYJ201706010&uniplatform=OVERSEA&v=nYvI6wYVWEedwj4Yx2j_CVfKO GUGTaAEkYaj_3tC5IxxRxI1Vvqr0Bm2sC8CirSe) (data obrashhenija: 09.08.2024).
3. Sol'nicev R. I., Korshunov G. I., Van Ljej. Postroenie dekarbonizirujushhej zamknutoj sistemy upravlenija «Priroda–Tehnogenika» // Programmnye produkty i sistemy. 2022. T. 35, № 4. S. 707–714. doi: 10.15827/0236-235X.140.707-714. (In Russ.).
4. Solnitsev R. I., Wang Lei. Modeling the interaction between energy source enterprises and industrial enterprises as «Nature-Technology» closed-loop control systems // Advances in Engin. Technol. Research. 2022. Vol. 1, no. 3. P. 746–751. doi: 10.56028/aetr.3.1.746.
5. Research on Identification Algorithm of Cascade Control System / D. Ding, Ya. Wang, W. Zhang, W. Chu // Math. Problems in Engin., 2022. Vol. 2022, iss. 1. Art. 3997081. 13 p. doi: 10.1155/2022/3997081.
6. Research on optimal control of improved linear active disturbance rejection for SCR denitrification system / Ch. Yang, Ch. Liu, Z. Wang, Ch. Han // J. of Chinese Society of Power Engineering, 2023. Vol. 43, no. 7. P. 893–900. doi: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.07.011. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=DONG202307011&uniplatform=OVERSEA&v=1Kq2hBlaiNjhgZlZTG P\\_ihdbIDO\\_kuqj9Dqj3gwmW7AtOYv3vyuY-D6tiprPDbT](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=DONG202307011&uniplatform=OVERSEA&v=1Kq2hBlaiNjhgZlZTG P_ihdbIDO_kuqj9Dqj3gwmW7AtOYv3vyuY-D6tiprPDbT) (data obrashhenija: 09.08.2024).
7. Liu X., Ge Sh. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system // Automation of Elect. Power Systems. 2020. Vol. 44, no. 8. P. 8–18. doi: 10.7500/AEPS20190523002. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=DLXT202008002&uniplatform=OVERSEA&v=F4nMUvjTbAuZOW\\_5CFY41v1ke\\_hVBr19xArDHI4p9XKWuXO74OjBaQpOuBNfaWk4](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=DLXT202008002&uniplatform=OVERSEA&v=F4nMUvjTbAuZOW_5CFY41v1ke_hVBr19xArDHI4p9XKWuXO74OjBaQpOuBNfaWk4) (data obrashhenija: 09.08.2024).
8. Emission reduction potential of air pollutants of thermal power industry based on carbon emission reduction target and emission standard constraint scenarios / Li Fei, Sun Xueli, Pang Bo, Zhu Fahua, Wang S, Yan Pei // Environmental Science. 2021. Vol. 42, no. 12. P. 5563–5573. doi: 10.13227/j.hjcx.202102167. URL: <https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=HJKZ202112001&uniplatform=OVERSEA&v=xQUcJGvGRRE05xzOALMZETaKo> (data obrashhenija: 09.08.2024).
9. Harvie A. J., de Mello J. C. OLIA: An open-source digital lock-in amplifier // Frontiers in Sensors. 2023. Vol. 4. Art. 1102176. doi: 10.3389/fsens.2023.1102176.
10. Research and application of a novel feedback controller / Li Jun, Huang Weijian, Wan Wenjun, Liu Zhe // Control Theory & Appl. 2020. Vol. 37, no. 2. P. 411–422. doi: 10.7641/CTA.2019.80723.
11. Liu Y., Meng W., Ding J. Design and performance analysis of a PID-PID cascade control system // J. of Yanbian University (Natural Sci. Ed.). 2023. Vol. 49, no. 4. P. 358–365. doi: 10.16379/j.cnki.issn.1004-4353.2023.04.006. URL: <https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2024&filename=YBDZ202304012&uniplatform=OVERSEA&v=vsYDC-IIIoGI9LrUbhEYleFMSmYS9WXX9a1jfOwQcMjvIw3y9DlGjjyV4sFAnkRd> (data obrashhenija: 09.08.2024).
12. Design and optimization of digitalization device of temperature control system using PID Ziegler-Nichols control in chemical engineering laboratory / C. Wiharya, H. Sungkowo, A. S. Suryandari, B. I. Kurniawan // 2<sup>nd</sup> Ann. Technol. Appl. Sci. and Eng. Conf. IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. Malang. 2021. Vol. 1073, no. 1. P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/1073/1/012051.
13. Besekerskij V. A., Popov E. P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. 4-e izd., pererab. i dop. SPb.: izd-vo «Professija», 2003. 752 s. (In Russ.).
14. Hybrid active disturbance rejection control for denitration system based on multiobjective optimization / X. Yang, X. Cui, G. Yu, A. Gao, J. Shu, T. Zhang // Control Eng. of China. 2023. Vol. 30, no. 11. P. 2066–2074. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210613. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=JZDF202311014&uniplatform=OVERSEA&v=3yP934wYsmE\\_wstIsS8XpkfEEQs1ptdAc\\_8pjAbfhUBvAZSbo71U41HbdDWrZKYy](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=JZDF202311014&uniplatform=OVERSEA&v=3yP934wYsmE_wstIsS8XpkfEEQs1ptdAc_8pjAbfhUBvAZSbo71U41HbdDWrZKYy) (data obrashhenija: 09.08.2024).
15. Fu Z., Zhuan X. PID parameter selftuning algorithm based on neural network and genetic algorithm // Eng. J. of Wuhan University. 2023. Vol. 56, no. 3. P. 379–386. doi: 10.14188/j.1671-8844.2023-03-015. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=WSSDD202303015&uniplatform=OVERSEA&v=IO7RktiMFile-gZ9k-Jf\\_iU9vgyI5hhFrHwhEHMwSylr7ts6x9RkWr3QeAKdX47](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=WSSDD202303015&uniplatform=OVERSEA&v=IO7RktiMFile-gZ9k-Jf_iU9vgyI5hhFrHwhEHMwSylr7ts6x9RkWr3QeAKdX47) (data obrashhenija: 09.08.2024).
16. Zhang Li, Sheng Q., Zhu Ch. Research on carbon dioxide emission control technology of rural thermal power generating units – based on genetic evolution and PID control // J. of Agricultural Mechanization Research. 2023. Vol. 45, no. 4. P. 260–264. doi: 10.13427/j.cnki.njyi.2023.04.044. (URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=NJYJ202304043&uniplatform=OVERSEA&v=tLiez38RgndCG-WwGq2xvGjqMzUbVqmxwskw4xRqU3iU8kNsmZ9\\_KHq62-TyAjQ](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2023&filename=NJYJ202304043&uniplatform=OVERSEA&v=tLiez38RgndCG-WwGq2xvGjqMzUbVqmxwskw4xRqU3iU8kNsmZ9_KHq62-TyAjQ)) (data obrashhenija: 09.08.2024).

17. Composite cascade control based on reinforcement learning for a SCR denitrification system / H. Chen, X. Jia, X. Sun, P. Hou // J. of China Society of Power Eng. 2022. Vol. 42, no. 5. P. 421–428. doi: 10.19805/j.cnki.jcspe.2022.05.005. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=DONG202205005&uniplatform=OVERSEA&v=IUBYzFqPA\\_gjyrtjB2fXP2zXg8IAaNJ7tX6MSruA2YjvXFJOnn o7bTyWUNlpElaD](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=DONG202205005&uniplatform=OVERSEA&v=IUBYzFqPA_gjyrtjB2fXP2zXg8IAaNJ7tX6MSruA2YjvXFJOnn o7bTyWUNlpElaD) (data obrashhenija: 09.08.2024).

18. Multi-model switching DMC-PID cascade predictive control for SCR flue gas denitrification system / Pengfei Hou, Xinchun Jia, Jianyun Bai, Qi Wang // Control Engin. of China. 2020. Vol. 27, no. 2. P. 355–360. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.20190308. URL: [https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=JZDF202002022&uniplatform=OVERSEA&v=7yRYSnHSNAgFAJPFd44B5KI9vx\\_qPO-I5vzklRD9SobftG38u8waYzJHT41I61Ff](https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2020&filename=JZDF202002022&uniplatform=OVERSEA&v=7yRYSnHSNAgFAJPFd44B5KI9vx_qPO-I5vzklRD9SobftG38u8waYzJHT41I61Ff) (data obrashhenija: 09.08.2024).

---

#### Information about the authors

**Remir I. Solnitsev** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer-Aided Design Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [remira70@mail.ru](mailto:remira70@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-0415-6382>

**Lei Wang** – postgraduate student of the Department of Computer-Aided Design Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [18361206765@163.com](mailto:18361206765@163.com)

Статья поступила в редакцию 10.06.2024; принята к публикации после рецензирования 01.09.2024; опубликована онлайн 25.11.2024.

Submitted 10.06.2024; accepted 01.09.2024; published online 25.11.2024.

---